第39卷 第6期
2022年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

不同灌溉量对新疆棉花生长发育及产量形成的影响

张 慧[1,2]， 张 凯[1,2]， 陈 冰[1,2]， 杨 川[1,2]， 柳 萍[1,2]

（1. 新疆农业大学资源与环境学院，新疆 乌鲁木齐 830052；
2. 新疆土壤与植物生态过程重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830052）

摘 要：研究了不同灌溉量对新疆棉花生长发育及产量形成的影响，旨在为新疆高产棉田水分高效利用提供理论依据。在膜下滴灌条件下开展大田试验，以正常灌溉量为对照（3071 $m^3 \cdot hm^{-2}$，I100），设3个亏缺梯度，轻度亏缺（2686 $m^3 \cdot hm^{-2}$，I85），中度亏缺（2421 $m^3 \cdot hm^{-2}$，I75），重度亏缺（1955 $m^3 \cdot hm^{-2}$，I60），在不同生育期测定了棉花株高、主茎节数、果枝数、结铃和脱落特征，在采收期测定了棉花产量构成，并计算了灌溉水利用效率。结果表明：(1) 各亏缺灌溉处理比正常灌溉处理下棉花的蕾期、花期、盛铃期、吐絮期分别提前了1~2 d、2~4 d、3~8 d、4~11 d；(2) 在进入铃期之前，棉花株高、主茎节间长度表现出随着灌溉量减少呈现先增加后降低的趋势，铃期之后均随着灌溉量的减少而降低；棉花在中部和下部冠层的结铃数和坐果数均随着灌水量的降低而减少，其中中部冠层的坐果数在不同灌溉处理间差异显著（P<0.05）；(3) 在采收期，I100处理的籽棉产量为6090 $kg \cdot hm^{-2}$，分别比亏缺灌溉处理高出7.4%~27.3%；灌溉水利用效率随着灌溉量的减少而提高，最高为2.27 $kg \cdot m^{-3}$。在综合考虑农业生产、水资源高效利用和生态环境等方面效益时，建议对新疆棉花进行适度亏缺灌溉，在保证较高作物产量的同时，提高灌溉水利用效率、节约水资源，实现社会经济和生态环境效益的最优化。

关键词：棉花；亏缺灌溉；结铃特征；灌溉水利用效率

棉花作为一种重要的经济作物，在全国乃至全世界都占有举足轻重的地位[1]。新疆气候干燥、积温较高且光照充足，具有得天独厚的植棉优势。据2020年报道，新疆棉花总产量高达516.1×10^4 t，占全国总产量的87.33%[2]，成为新疆的支柱产业之一。新疆属于典型的温带大陆性干旱气候[3]，年均降水量150 mm，年均蒸发量1600~2200 mm，是我国水资源严重短缺的地区[4]；而棉花作为新疆的主导产业消耗了大量的农业用水，农业用水匮乏和分布不均制约着新疆棉花产业的可持续发展[5]。因此，节水灌溉是新疆棉花产业发展的根本出路。

国内外学者就灌溉量和灌溉时期对棉花生长发育的影响进行了大量的研究。灌溉量对棉花高产及节水灌溉尤为重要。过量灌溉不仅会造成水资源浪费，还会导致棉花旺长，如主茎节间延长、果枝长度增加、植株个体偏大[6-7]，同时棉花成熟时间延后[7]、根系分布浅，也会影响植株对土壤养分的吸收和利用[8]。而水分亏缺则会使棉花生物量降低，果枝台位、总铃数减少，单铃重变小[9]，并造成棉花早衰[10]，导致棉花产量降低[11-12]。棉花在不同生育期对水分亏缺的响应不同。王允[13]研究表明，棉花在苗期、蕾期进行水分胁迫，可以控制营养生长，提高干物质积累速率，进而提高棉花产量；姜梦辉等[14-16]研究表明，水分对棉花蕾期至花铃期影响最为显著，此时期亏缺灌溉处理会造成花蕾大量脱落、结铃性差，进而降低产量；李志博等[17-18]研究表明，棉花盛铃期是棉花生长发育和产量形成的关键时期。因此，明确棉花不同生育期对水分亏缺的响应及其对籽棉产量的影响尤为重要。

本文结合新疆棉田膜下滴灌模式，通过设置不同灌溉量处理，研究了棉花生长发育特征和产量形成过程对水分亏缺的响应，旨在明确棉花产量形成与灌溉量之间的关系，评估灌溉量对棉花产量和灌溉水利用效率的影响，为新疆棉田的节水灌溉和水

收稿日期：2022-06-20； **修订日期：**2022-08-25
基金项目：新疆维吾尔自治区天山青年计划 项目“新疆棉花水分诊断及调控技术研究”（2019Q076）
作者简介：张慧（1997-），女，硕士研究生，主要研究方向为水分高效利用. E-mail: 1030974486@qq.com
通讯作者：张凯. E-mail: zhangkai4595241@163.com

资源可持续利用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验地位于新疆阜康市彭家湾村(88°0′44.30″E,44°10′21.05″N)冰湖三队棉花种植区,地处天山东段(博格达山)北麓,属于典型的大陆性干旱气候,年平均气温6.8 ℃,7月平均气温25.2 ℃,年均无霜期176 d,年日照时数2933 h,光热资源充足,年降雨量226.9 mm,田间持水率为15.46%,适宜棉花的生长。该地区农业主要利用干流河道和区域地下水灌溉,土壤类型主要是灌耕土,属于典型干旱灌溉农业区。

1.2　试验设计

为明确膜下滴灌条件下水分调控对棉花生长发育及产量形成的影响,以及棉花各生育期的需水特点。本研究于2021年4月27日开始播种,棉花品种为新陆早74号,种植模式为膜下滴灌,采用"一膜一带两行"的方式种植,膜宽70 cm,两膜间宽10 cm,每行内棉花株距10 cm。

试验以当地正常灌溉量为对照(3071 $m^3\cdot hm^{-2}$),设置4个亏缺灌溉梯度,轻度缺水(正常灌溉的85%,2686 $m^3\cdot hm^{-2}$),中度缺水(正常灌溉的75%,2421 $m^3\cdot hm^{-2}$),重度缺水(正常灌溉的60%,1955 $m^3\cdot hm^{-2}$),分别以I100、I85、I75、I60代表4种不同的处理小区。每个处理4个重复,共设置16个小区,小区面积为6 m×8 m。棉花灌溉参考当地农户灌溉情况,在整个生育期共进行了6次滴水,滴水量及滴水时间如表1所示(7月4日,农户灌溉时,试验地棉花未表现缺水状况,故未进行灌溉;其他灌溉时间同农户)。于6月13日—8月10日进行滴灌处理,灌溉量由水表测定。棉田肥料施用一致,磷肥采用磷酸一铵(N含量12%,P_2O_5含量61%),用量为150 $kg\cdot hm^{-2}$、氮肥采用尿素(N含量46%),用量为250 $kg\cdot hm^{-2}$、钾肥采用农业用硫酸钾(K_2O含量50%),用量为75 $kg\cdot hm^{-2}$,在棉花各生育期分6次随水滴灌施入,施肥状况如表2所示。本研究除滴灌量不同外,棉田生育期内其他管理与农艺措施均按常规大田进行。

1.3　测定方法

生育期调查方法:出苗后在每个小区内选取连续的10株棉花,内外行各5株,调查棉花的生育进程(苗期、蕾期、花期、盛铃期、吐絮期),记录棉花进入各生育时期的日期。

生长发育性状测定:在棉花的全生育期对16个小区棉花的生长性状进行定点测定,每小区选取长势均匀的连续10株(内外行各5株)标记定点调查,在第一次灌溉处理后开始记录棉花的株高(从子叶

表1　不同处理滴灌时间和滴灌水量

Tab. 1　Drip irrigation time and amount of drip irrigation in different treatments

处理	滴灌时间							全生育期灌溉总量/($m^3\cdot hm^{-2}$)
	出苗水	苗期	蕾期	花期	花铃期		盛铃期	
	5月10日	6月13日	6月26日	7月13日	7月22日	7月30日	8月10日	
I100	650	807	323	344	286	229	432	3071
I85	650	682	271	292	245	193	354	2686
I75	650	641	250	219	193	177	292	2421
I60	650	490	167	151	139	125	234	1955

表2　施肥时间及施肥量

Tab. 2　Fertilization time and fertilizer application

时间	磷酸一铵/($kg\cdot hm^{-2}$)	尿素/($kg\cdot hm^{-2}$)	农业用硫酸钾/($kg\cdot hm^{-2}$)
6月13日	41	80	25
6月26日	41	80	25
7月13日	55	107	33
7月22日	55	107	33
7月30日	55	107	33

节至主茎生长点)、主茎节数、果枝数、果枝台位,蕾、花、铃生长及其脱落的数量,测定时间分别是6月24日、7月6日、7月18日、8月7日、8月27日、9月13日。吐絮期测定植株上层(上部冠层总果枝的1/3)、中层(中部冠层总果枝的1/3)和下层(下部冠层总果枝的1/3)蕾、花、铃生长及其脱落的数量。

产量测定方法:在每个处理的小区内选择长势整齐的地方随机取1 m×1 m样点,记录植株密度和单株铃数;在每个小区分别随机摘取冠层上、中、下部位棉花各10朵,装入纱网袋中自然风干,随后对籽棉称重;计算单位面积籽棉产量=植株密度×单株铃数×单铃重。

灌溉水利用效率计算:IWUE=Y/I。IWUE表示灌溉水利用率(IWUE, irrigation water use efficiency),$kg\cdot m^{-3}$;Y为棉花的籽棉产量,$kg\cdot hm^{-2}$;I为滴灌棉花全生育期灌水量,$m^3\cdot hm^{-2}$。

1.4 数据处理

实验数据为平均值±标准误差,采用单因素方差分析比较不同处理间某一测定指标的差异显著性,多重比较采用LSD检验法,用SPSS 25.0统计软件(SPSS Inc., Chicago, IL, USA)进行分析,对数据以Microsoft Excel 2019进行整理后Origin 2021绘图。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉处理对棉花生长发育的影响

2.1.1 生育时期 由表3可知,亏缺灌溉处理比对照处理的生育时期要提前。与对照组相比,随着水分亏缺程度的加剧,棉花的蕾期、花期、盛铃期、吐絮期的时间分别比对照组提前了1~2 d、2~4 d、3~8 d、4~11 d。

2.1.2 生长发育过程 株高和主茎节间长度可反映棉花生长情况[19]。由图1a和图1b可知,随着生育时期的进程,棉花株高和主茎节间长度呈现先快速增长又逐渐趋于平缓的趋势。在6月24日进入现蕾期之后株高和主茎节间长度均以轻度亏缺的I85处理最大,I75处理最低,且不同处理组之间存在显著性差异($P<0.05$),7月18日以后,株高随着灌溉量的减少而降低,主茎节间长度无明显变化。

棉花的坐果台位无明显变化,果枝数呈现先快速增长又逐渐趋于平缓的趋势(图1c、图1d)。从不同的灌溉处理来看,开花期之后棉花的果枝数随着灌溉量的减少而降低,在8月7日盛铃期果枝数在各处理间达到显著性差异($P<0.05$)。

2.2 不同灌溉处理对棉花产量形成过程的影响

2.2.1 不同生育期单株蕾铃数和单位水量的蕾铃荷载量 棉花单株蕾铃数在不同生育期对灌水量的响应不同。在蕾期、花期不同灌水量对棉花蕾铃生长影响不大,在幼铃期和成铃期随着灌水量的减少,棉铃数量呈现明显的递减趋势(图2a),表明幼铃期和成铃期棉花对水分较敏感。另外,在棉花的各个时期随着灌水量的减少,单位水量蕾铃荷载量呈现增多的趋势,以I60处理最多,以蕾期和花期梯度变化差异最大(图2b)。

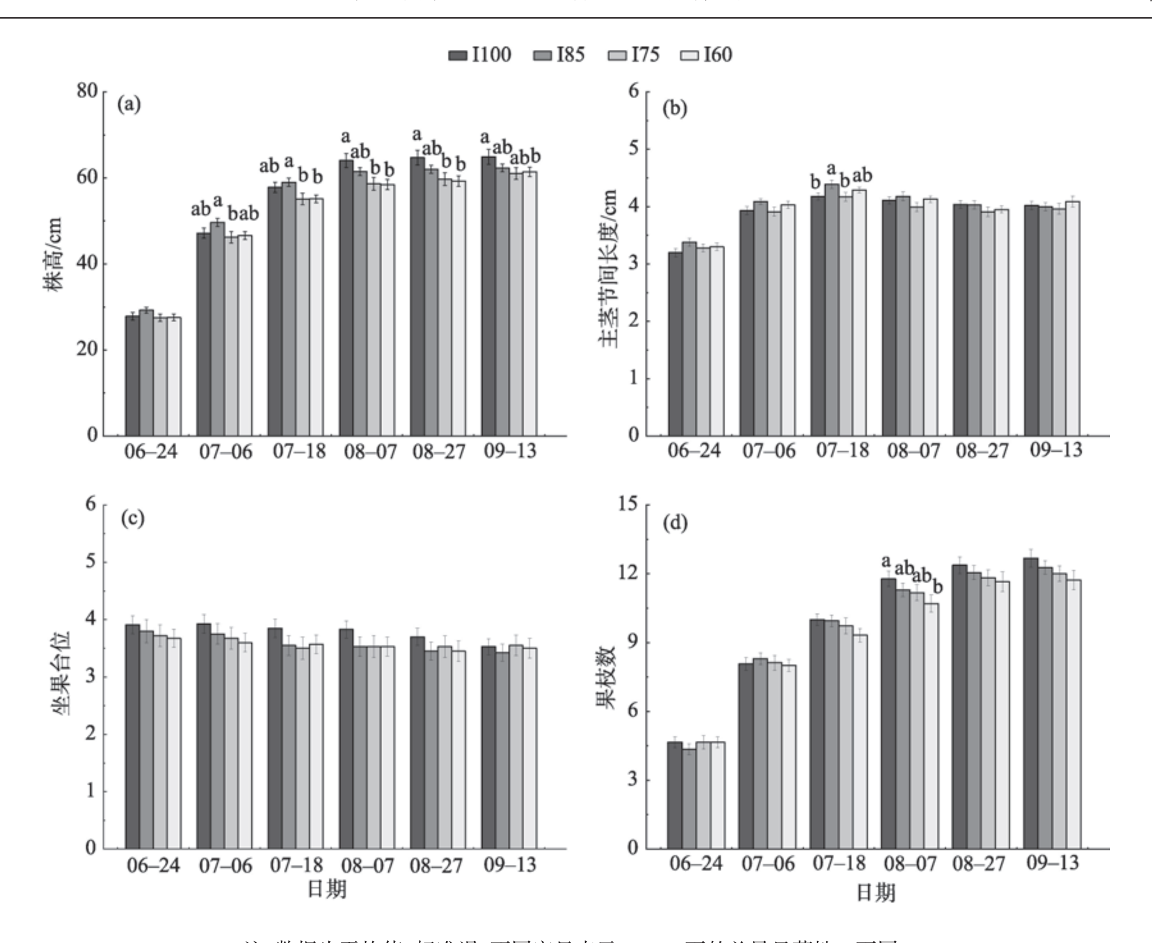
2.2.2 棉花结铃和坐果特征 不同灌溉处理对棉花冠层不同部位的结铃和坐果特征影响不同[20]。从图3可以看出,棉花的结铃和坐果大多分布于中部和下部冠层,且随着灌水量的减少而减少。在棉花上部冠层,随灌溉量的减少,结铃呈现先增多后降低的变化趋势,以I85灌溉处理的总结铃数最多,为5.05个$\cdot$株$^{-1}$。从不同冠层来看,下部冠层的坐果数最多,上部冠层的坐果数最少,中部冠层的坐果数在不同的灌溉处理组之间存在显著性差异($P<0.05$),且随着灌溉量的降低而减少,降幅为26%。

2.2.3 棉花节枝比和棉铃脱落率 节枝比即棉花单株平均果节数与果枝数的比值,节枝比越大,单台果枝平均果节数越多。从图4中可以看出,相比于

表3 不同灌溉条件下棉花生育时期的变化

Tab. 3 Changes of cotton growth period under different irrigation conditions

处理	生育时期				
	苗期	蕾期	花期	盛铃期	吐絮期
I100	5月17日	6月23日	7月10日	8月7日	9月12日
I85	5月17日	6月22日	7月8日	8月4日	9月8日
I75	5月17日	6月22日	7月8日	8月2日	9月5日
I60	5月17日	6月21日	7月6日	7月30日	9月1日



注:数据为平均值±标准误,不同字母表示 P<0.05下的差异显著性。下同。

图1 不同灌溉处理对棉花株高、主茎节间长度、坐果台位、果枝数的影响

Fig. 1 Effects of different irrigation treatments on cotton plant height, main stem internode length, fruit setting platform position and fruit branch number

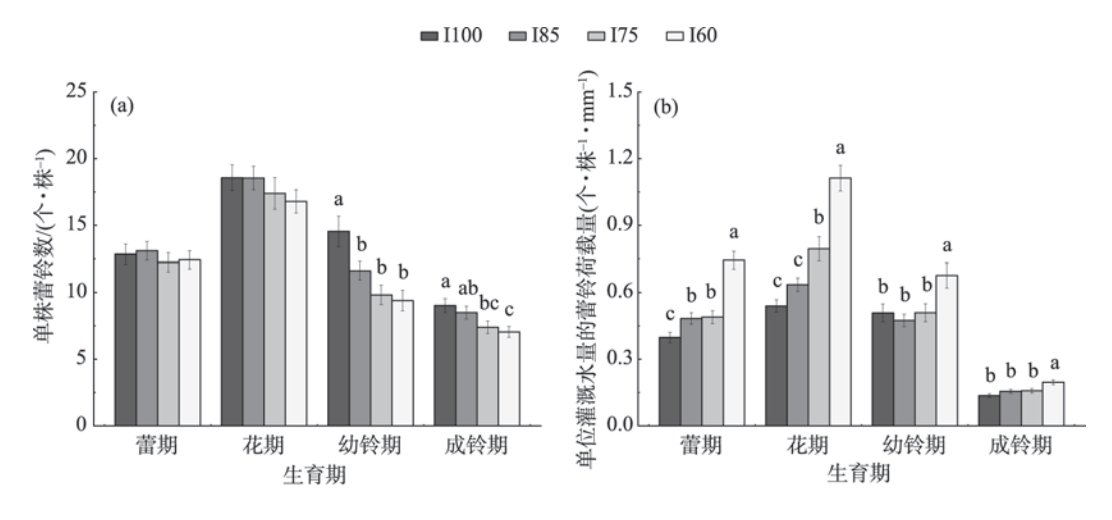


图2 不同灌溉量对不同生育期蕾铃荷载量的影响

Fig. 2 Effect of unit water volume in different growth periods on the load of buds and bolls under different irrigation

上部冠层,棉花中部冠层和下部冠层的节枝比更大。在棉花上部冠层,随着灌水量的减少,节枝比呈先增大后减小的趋势,且存在显著性差异(P<0.05),以I85处理最大,为1.46。

本研究中不同冠层的棉铃脱落率表现为:上部冠层>中部冠层>下部冠层(图5)。从不同灌溉处

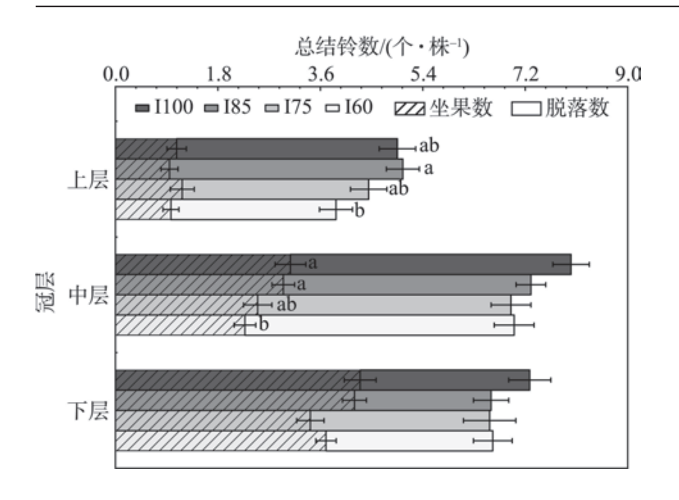


图3 不同灌溉处理对棉花结铃、脱落及坐果特征的影响

Fig. 3 Effects of different irrigation treatments on boll setting, abscission and fruit setting characteristics of cotton

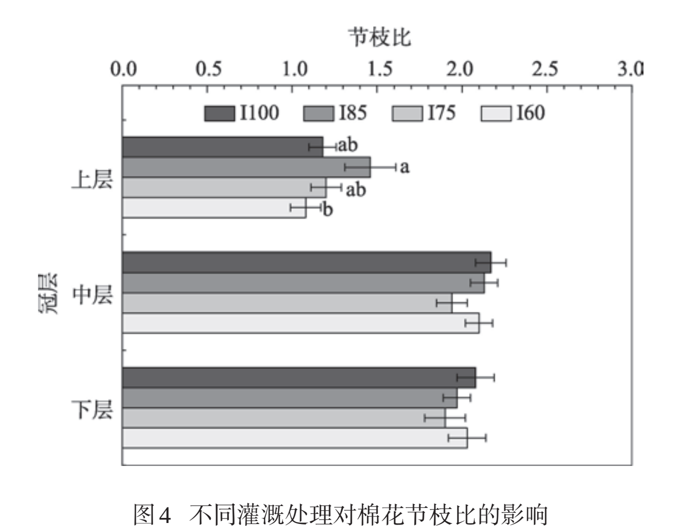


图4 不同灌溉处理对棉花节枝比的影响

Fig. 4 Effects of different irrigation treatments on cotton branch ratio

理来看，在棉花上部冠层，棉铃脱落率以I85最高，为81.19%，以I75最低，为73.6%；在棉花中部冠层，随灌溉量的减少，棉铃脱落率呈现先减少后增多的趋势，以I85最低，为59.59%；在棉花下部冠层，棉铃脱落率以I75最高，为47.9%，以I85最低，为36.47%。

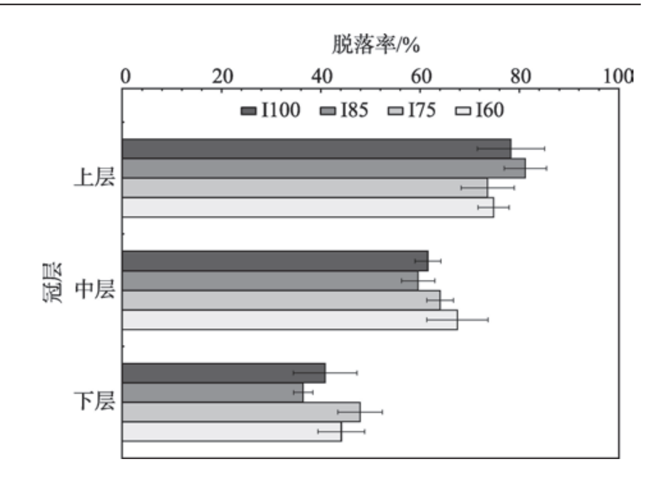


图5 不同灌溉处理对棉铃脱落率的影响

Fig. 5 Effect of different irrigation treatments on cotton boll abscission rate

2.3 不同灌溉处理对棉花干物质积累与分配的影响

灌溉量显著影响棉花各器官的干物质积累。采收期各处理棉花干物质积累量依次为：I100>I85>I75>I60（表4），表明灌溉量越高越有助于棉花生物量生产。从各器官干物质分配来看，生殖器官与营养器官在正常灌溉组与亏缺灌溉组之间存在显著性差异（$P<0.05$），随水分亏缺程度的增加，生殖器官干物质积累量逐渐减少，营养器官干物质积累量表现为：I100最大，I75最小。随水分亏缺的增加，群体干物质向生殖器官分配比例有下降趋势，生殖器官生物量占总生物量的比例依次为：I100>I75>I85>I60。

2.4 不同灌溉处理对棉花产量及构成因子的影响

将不同灌溉处理下棉花植株的单株结铃数、单铃重和籽棉产量进行显著性分析，结果表明：正常灌溉的单株结铃数、籽棉产量分别比亏缺灌溉组高出3.5%~24.9%和7.4%~27.3%，且存在显著性差异（$P<0.05$）（表5）。可见，水分主要通过影响单株结铃数而影响产量，而单铃重对籽棉产量影响不大。

表4 不同灌溉量对棉花各器官生物量的影响

Tab. 4 Effects of different irrigation rates on biomass of cotton organs

处理	根/(g·株⁻¹)	茎/(g·株⁻¹)	叶/(g·株⁻¹)	壳/(g·株⁻¹)	絮+籽/(g·株⁻¹)	营养器官/(g·株⁻¹)	生殖器官/(g·株⁻¹)	总生物量/(g·株⁻¹)
I100	4.98±0.10a	20.05±0.65a	2.34±0.21	19.43±0.94a	49.3±1.21a	27.37±0.68a	68.73±1.12a	96.1±1.73a
I85	4.71±0.15a	15.17±0.18b	3.52±0.83	13.03±0.23b	33.85±0.41b	23.40±0.82b	46.88±0.62b	70.28±1.27b
I75	3.91±0.14b	14.12±0.53b	2.58±0.72	12.52±0.53b	34.32±0.60b	20.61±0.97c	46.84±1.1b	67.45±1.65b
I60	4.69±0.23a	14.85±0.42b	2.65±0.28	11.89±0.43b	33.03±1.24b	22.19±0.81bc	44.92±1.67b	67.11±1.58b

注：不同小写字母表示棉花各器官间差异显著（$P<0.05$）。下同。

表5 不同灌溉量对棉花产量及产量构成因子的影响

Tab. 5 Effects of different irrigation rates on cotton yield and yield components

处理	密度/(10^4株·hm^{-2})	单株铃数/(个·$株^{-1}$)	单铃重/(g·$株^{-1}$)	籽棉产量/(kg·hm^{-2})
I100	12.25±0.25	8.92±0.37a	5.59±0.12	6090.00±218.69a
I85	12.50±0.65	8.61±0.60a	5.29±0.08	5642.12±262.84b
I75	12.25±1.03	8.67±0.54a	5.22±0.06	5476.07±239.28b
I60	12.75±0.63	6.70±0.53b	5.26±0.21	4429.92±91.95b

2.5 不同灌溉处理下棉花生长发育过程与产量构成的相关性分析

由表6可以看出,棉花生长发育过程指标中,与单株结铃数正相关系数最大的是节枝比,相关系数为0.37,其次是株高和主茎节间长度;棉铃脱落率与单株结铃数呈显著负相关(P<0.01)。与单铃重正相关系数最大的是节枝比和脱落率,相关系数为0.28和0.29。

2.6 不同灌溉处理下灌溉水利用效率与产量的相互关系

对不同灌溉量处理的籽棉产量和灌溉水利用效率进行分析,结果表明:籽棉产量随着灌溉量的增加,呈现逐渐增加的趋势,在充足灌溉时产量达到最大,为6090 kg·hm^{-2};灌溉水利用效率随着灌水量的增加,呈现逐渐降低的趋势,在亏缺灌溉I60处理时灌溉水利用效率最高,为2.27 kg·m^{-3}(图6)。

3 讨论

3.1 不同灌溉量对棉花生长发育的影响

在干旱区植棉,灌溉是调控棉花生长发育的有效手段,对棉花产量和品质有重要影响[10]。本研究结果表明,适度亏缺灌溉可造成水分胁迫,促进棉花提早进入生殖生长,这可以增加棉铃的生长时间,提高单铃重,在新疆无霜期短的环境条件下,有利于棉花的高产;而过度亏缺灌溉不利于棉花的生长,会使棉株矮小、果枝数减少、主茎节数减少、节间长度缩短,与Zhang等[21]的研究结果相同。本研究还发现,处理I85在蕾期有较高的株高和提前发育的果枝,这与张世民[22]和刘素华等[23]研究结果类似,这可能是因为适度的亏缺灌溉降低了土壤含水量,有利于早春地温的提升和棉花的生长发育,因此可在蕾期进行适度亏缺灌溉,为花铃期棉铃的生长打下基础。现蕾之后,果枝的生长较快;幼铃期时,果枝增长对水分较为敏感,因此,在此时期进行适量灌溉,可较快促进棉花株高的增长和果枝数的增加。

3.2 不同灌溉量对结铃及蕾铃脱落特征的影响

果枝数和节枝比是影响棉花结铃数的直接因子。本研究发现,中部和下部冠层的节枝比和结铃数在不同处理间无显著差异,而上部冠层的节枝比和结铃数均表现出随灌溉量增加而先增加后降低的趋势,表明适度亏缺灌溉可通过提高节枝比提高棉花结铃数,而过度亏缺或过量灌溉会降低节枝比和棉花结铃数。

中部冠层与下部冠层的坐果数明显多于上部冠层,且上部冠层坐果数在不同灌溉量处理间差异显著,表明水分亏缺程度的加剧严重影响棉株上部坐果,这可能与棉花不同生育时期的生长限制因子不同有关。棉花下部冠层多为伏前桃,其春季生长主要受温度控制,水分消耗量相对较低,灌溉量对其影响不显著;而中上部冠层多为伏桃,其生长发育时天气炎热,水分消耗量大,此时,灌溉量对其影响较为显著。因此,在棉花的灌溉管理中,应特别注意高温天气的水分调控。

另外,棉花下部冠层棉铃偏多,也与下部冠层

表6 棉花生长发育过程与产量构成的相关性分析

Tab. 6 Correlation analysis between cotton growth and yield components

	株高	主茎节间长度	果枝数	节枝比	脱落率
单株铃数	0.35	0.29	−0.03	0.37	−0.65**
单铃重	−0.07	0.16	−0.18	0.28	0.29

注:**表示在0.01级别(双尾)上相关性显著。

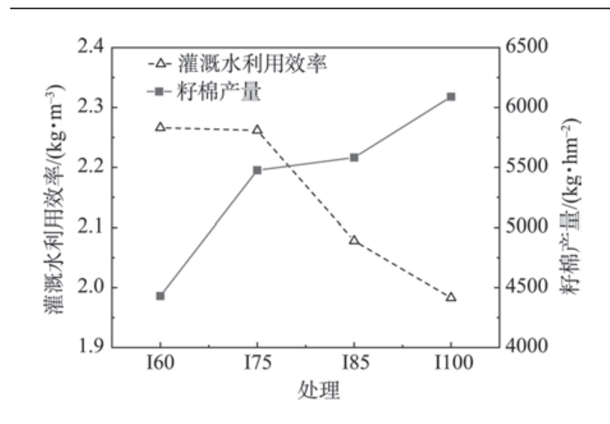


图6 灌溉水利用效率与产量的相互关系

Fig. 6 Relationship between irrigation water use efficiency and yield

棉铃生长时间长,且脱落率低有关[24]。在棉花中部及下部冠层,棉铃的脱落率随水分亏缺程度加剧略有增加趋势,这与申孝军等[7,25-27]研究结果基本一致,可能是棉花通过调节自身的蕾铃脱落来应对水分胁迫环境的结果。而在保证适量坐果数的前提下,多余蕾铃的脱落可以避免后期蕾铃间的养分竞争,确保有效铃发育成熟。

3.3 不同灌溉处理对棉花产量及灌溉水利用效率的影响

亏缺灌溉会对棉花籽棉产量造成影响[28-29]。本研究表明,在实施亏缺灌溉的环境下,下降较为明显的是单株结铃数,且盛花期和幼铃期亏缺灌溉将会对棉花单株铃数、籽棉产量造成严重的影响,这与申孝军等[30-31]的研究结果相似。这可能是盛花期为棉株营养生长和生殖生长并行的关键时期,是需水高峰期,此时对棉花进行过度水分亏缺处理将会导致棉株内部正常的生理代谢失调从而引起大量蕾铃脱落,降低籽棉产量。而翟中民等[32-33]研究认为,过多的灌溉量也会影响产量,这可能是因为棉花是多年生作物,过多的水分会导致棉花营养生长-生殖生长失衡,过多的资源分配到营养生长,而抑制了生殖生长,导致棉花晚熟减产。

灌溉水利用效率随灌溉量增加而降低,籽棉产量随灌溉量增加而增加(图6),二者之间存在权衡,这与申孝军等[34]研究结果一致。在综合考虑农业生产、水资源高效利用和生态环境等方面效益时,建议对新疆棉花进行适度亏缺灌溉,在保证较高作物产量的同时,提高灌溉水利用效率、节约水资源,实现社会经济和生态环境效益的最优化。

4 结 论

本文研究了不同灌溉量对棉花生长发育、产量形成和灌溉水利用效率的影响,结果表明:

(1) 亏缺灌溉可促进棉花开花和结铃时间的提前,缩短整个棉花的生育期。

(2) 但水分过度亏缺会影响蕾铃的发育,减少果枝果节的分化和棉铃的形成,特别是中上部冠层的结铃和坐果数对水分的响应更敏感。

(3) 从产量构成看,亏缺灌溉主要通过减少单株结铃数而造成产量降低。

(4) 灌溉水利用效率随着灌溉量的减少而提高,籽棉产量随着灌溉量的减少而降低,二者之间存在权衡。

因此,在综合考虑农业生产、水资源高效利用和生态环境等方面效益时,建议对新疆棉花进行适度亏缺灌溉,在保证较高作物产量的同时,提高灌溉水利用效率、节约水资源,实现社会经济和生态环境效益的最优化。

参考文献(References):

[1] Akram H M, Ali A, Sattar A, et al. Impact of waterdeficit stress on various physiological and agronomic traitsof three Basmati rice (*Oryza sativa* L.) cultivars[J]. Journal of Animal and Plant Sciences, 2013, 23(5): 1415-1423.

[2] 刘磊, 陈元翰, 雷紫翔. 新疆棉花产业高质量发展研究[J]. 宏观经济管理, 2021(10): 77-83, 90. [Liu Lei, Chen Yuanhan, Lei Zixiang. Study on high quality development of cotton industry in Xinjiang[J]. Macroeconomic Management, 2021(10): 77-83, 90.]

[3] 郑媛芳. 新疆水资源分布及脆弱性评价[J]. 陕西水利, 2018(S1): 39-41. [Zheng Yuanfang. Distribution and vulnerability assessment of water resources in Xinjiang[J]. Shaanxi Water Resources, 2018(S1): 39-41.]

[4] 刘翔, 张富仓, 向友珍, 等. 亏缺灌溉对南疆棉花生长和水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(12): 1270-1276. [Liu Xiang, Zhang Fucang, Xiang Youzhen, et al. Effects of deficit irrigation on cotton growth and water use in southern Xinjiang of China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(12): 1270-1276.]

[5] 范志超, 张巨松, 石俊毅, 等. 调亏灌溉对滴灌棉花光合生产的调节补偿效应[J]. 西北农业学报, 2017, 26(10): 1461-1469. [Fan Zhichao, Zhang Jusong, Shi Junyi, et al. Effect of soil water content on photosynthetic and yield of drip irrigation in cotton under regulated deficit irrigation[J]. Acta Agriculturae Boreali-occi-

dentalis Sinica, 2017, 26 (10): 1461−1469.]

[6] 董倩倩, 范文波, 许忠宇. 滴灌水量和土壤温度对桶栽棉花土壤剖面 CO_2 浓度影响的试验研究[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 636−644. [Dong Qianqian, Fan Wenbo, Xu Zhongyu, et al. Experimental study on the effect of drip irrigation water volume and soil temperature on CO_2 concentration in soil profile of barrelplanted cotton[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 636−644.]

[7] 申孝军, 张寄阳, 刘祖贵, 等. 膜下滴灌条件下不同水分处理对棉花产量和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 118−124. [Shen Xiaojun, Zhang Jiyang, Liu Zugui, et al. Effects of different water treatments on yield and water use efficiency of cotton with drip irrigation under film mulch[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(2): 118−124.]

[8] 牛媛, 杨相昆, 张占琴, 等. 揭膜种植方式下不同灌水量对棉花干物质积累及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(2): 291−301. [Niu Yuan, Yang Xiangkun, Zhang Zhanqin, et al. Effects of different irrigation amounts on dry matter accumulation of cotton under film uncovering cultivation[J]. Xinjiang Agricultural Science, 2022, 59(2): 291−301.]

[9] 梁福斌. 水分亏缺对棉花铃叶系统光合性能及水分利用效率的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2019. [Liang Fubin. Effects of Water Deficit on Photosynthetic Characteristic and Water Use Efficiency of Boll Leaf System of Cotton[D]. Shihezi: Shihezi University, 2019.]

[10] Chen Y Z, Dong H Z. Mechanisms and regulation of senescence and maturity performance in cotton[J]. Field Crops Research, 2016, 189: 1−9.

[11] Feng L, Bufon V B, Mills C I, et al. Effects of irrigationand plant density on cotton within-boll yield components[J]. Agronomy Journal, 2010, 102: 1032−1036.

[12] Feng L, Mathis G, Ritchie G, et al. Optimizing irrigation and plant density for improved cotton yield and fiberquality[J]. Agronomy Journal, 2014, 106: 1111−1118.

[13] 王允. 不同生育期水分亏缺对盆栽棉花生长发育的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016. [Wang Yun. Effects of Water Deficit at Different Growth Stages on the Growth and Development of Potted Cotton[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.]

[14] 姜梦辉, 孙丰磊, 杨阳, 等. 棉花陆海重组自交系群体花铃期抗旱性鉴定及评价[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1635−1643. [Jiang Menghui, Sun Fenglei, Yang Yang, et al. Identification and evaluation of drought resistance of upland-island recombination inbred line population at blossoming and boll-forming stages[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1635−1643.]

[15] 田又升, 范术丽, 庞朝友, 等. 全生育期干旱胁迫对棉花形态、生理、光合作用和产量的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(5): 224−231. [Tian Yousheng, Fan Shuli, Pang Zhaoyou, et al. Effects of drought stress in the whole period on cotton morphology, physiology, photosynthesis and yield[J]. Acta Agriculturae Boreal-Sinica, 2017, 32(5): 224−231.]

[16] 姚青青, 孙绘健, 马兴旺, 等. 减量追施氮肥运筹对棉花地上部干物质积累、分配及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(8): 1398−1405. [Yao Qingqing, Sun Huijian, Ma Xingwang, et al. Effects of reduced-amount nitrogen application on cotton aboveground dry matter accumulation, distribution and yield [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(8): 1398−1405.]

[17] 李志博, 徐建伟, 李衡, 等. 后期持续干旱对北疆棉花生长发育的影响及其抗旱适应性评价[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 45−49, 82. [Li Zhibo, Xu Jianwei, Li Heng, et al. Effect of prolonged drought during late growth stage on growth of cotton and evaluation of its drought resistance in North Xinjiang[J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2014, 32(3): 45−49, 82.]

[18] 代健敏, 何庆雨, 谢玲, 等. 氮肥后移对花铃期水分亏缺棉花产量的补偿效应研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 986−995. [Dai Jianmin, He Qingyu, Xie Ling, et al. Compensation effect of nitrogen fertilizer post-shift on water-deficient cotton yield at different stages[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 986−995.]

[19] 王宁, 冯克云, 南宏宇, 等. 不同水分条件下有机无机肥配施对棉花根系特征及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(11): 2187−2201. [Wang Ning, Feng Keyun, Nan Hongyu, et al. Effects of combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer on root characteristics and yield of cotton under different water conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(11): 2187−2201.]

[20] 杜刚锋, 汪江涛, 孙雪冰, 等. 不同灌溉方式和灌水量对棉花冠层叶铃配置的影响[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(7): 1177−1186. [Du Gangfeng, Wang Jiangtao, Sun Xuebing, et al. Effects of irrigation method and irrigation amount on cotton crown leaf boll configuration[J]. Xinjiang Agricultural Science, 2019, 56(7): 1177−1186.]

[21] Zhang D, Luo Z, Liu S, et al. Effects of deficit irrigation and plant density on the growth, yield and fiber quality of irrigated cotton[J]. Field Crops Research, 2016, 197: 1−9.

[22] 张世民. 调亏灌溉对棉花生长生理和产量的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2017. [Zhang Shimin. Effects of Regulated Deficit Irrigation on Growth Physiology and Yield of Cotton[D]. Aral: Tarim University, 2017.]

[23] 刘素华, 彭延, 彭小峰, 等. 调亏灌溉与合理密植对旱区棉花生长发育及产量与品质的影响[J]. 棉花学报, 2016, 28(2): 184−188. [Liu Suhua, Peng Yan, Peng Xiaofeng, et al. Effects of regulated deficit irrigation and plant density on plant growth and yield and fiber quality of cotton in dry land area[J]. Cotton Science, 2016, 28(2): 184−188.]

[24] 王瑞. 花铃期持续土壤干旱影响棉花产量品质形成的生理生态机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016. [Wang Rui. Ecological and Physiological Responses of Cotton to Drought During Flowering and Boll-forming Period[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.]

[25] 何佩云, 张余, 周良, 等. 干旱胁迫及氮肥调控对苦荞植株形态、

生理特性及产量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(1): 128- 134. [He Peiyun, Zhang Yu, Zhou Liang, et al. Effects of drought stress and nitrogen fertilizer regulation on morphology, physiological characteristics and yield of *Fagopyrum tataricum*[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28 (1): 128-134.]

[26] 杨甜甜. 不同灌溉梯度下无膜棉生长发育模拟与产量评估[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2022. [Yang Tiantian. Growth Simulation and Yield Evaluation of Membrane-less Cottonunder Different Irrigation Gradients[D]. Aral: Tarim University, 2022.]

[27] 龚雨田, 孙书洪, 闫宏伟. 不同生育期水分胁迫对玉米农艺性状的影响[J]. 节水灌溉, 2017(5): 34- 36, 41. [Gong Yutian, Sun Suhong, Yan Hongwei. Effects of water stress on agronomic traits of the maize at different growth stages[J]. Water Saving Irrigation, 2017(5): 34-36, 41.]

[28] 姬清元, 张富仓, 肖超, 等. 土壤水分调控对棉花生长和土壤水盐分布的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 1-12. [Ji Qingyuan, Zhang Fucang, Xiao Chao, et al. Effects of soil water regulation on cotton growth and soil water-salt distribution[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2023, 51(1): 1-12.]

[29] 刘雪艳, 丁邦新, 白云岗, 等. 微咸水膜下滴灌对棉花生长及产量的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1627-1634. [Liu Xueyan, Ding Bangxin, Bai Yungang, et al. Effects of drip irrigation under brackish water film on cotton growth and yield[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1627-1634.]

[30] 申孝军, 孙景生, 张寄阳, 等. 水分调控对麦茬棉产量和水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 150-160. [Shen Xiaojun, Sun Jingsheng, Zhang Jiyang, et al. Effects of different water treatment on yield and water use of transplanted cotton following wheat harvest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 150-160.]

[31] 解婷婷, 单立山, 苏培玺. 不同施氮量下干旱胁迫对棉花生长及种内关系的影响[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(5): 643-651. [Xie Tingting, Shan Lishan, Su Peixi. Effects of drought stress on cotton growth and intraspecific relationship under different nitrogen application rates[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(5): 643-651.]

[32] 翟中民, 史文娟, 张艳超, 等. 水氮盐调控对膜下滴灌棉花产量的影响及耦合模型[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(7): 721-728. [Zhai Zhongmin, Shi Wenjuan, Zhang Yanchao, et al. Effect of water, nitrogen and salt regulation on cotton yield under mulch film drip irrigation and its coupled model[J]. Journal of and Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(7): 721-728.]

[33] 罗宏海, 朱建军, 张旺锋. 滴灌棉田根区水分对棉花干物质生产及水分利用效率的影响[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(4): 622-628. [Luo Honghai, Zhu Jianjun, Zhang Wangfeng. Effect of water around root zone on dry matter production and water use efficiency of cotton under drip irrigation[J]. Xinjiang Agricultural Science, 2011, 48(4): 622-628.]

[34] 申孝军, 张寄阳, 孙景生, 等. 灌水模式及下限对滴灌棉花产量和品质的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(8): 711-718. [Shen Xiaojun, Zhang Jiyang, Sun Jingsheng, et al. Effects of drip irrigation pattern and irrigation lower limit on yield and quality of cotton[J]. Journal of and Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(8): 711-718.]

Effects of different irrigation rates on cotton growth and yield formation in Xinjiang

ZHANG Hui[1,2], ZHANG Kai[1,2], CHEN Bing[1,2], YANG Chuan[1,2], LIU Ping[1,2]

(1. College of Grassland and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: To study the effects of different irrigation amounts on cotton growth and yield formation in Xinjiang to provide a theoretical basis for water-efficient utilization in high-yield cotton fields in Xinjiang. The field experiment was conducted under drip irrigation under the film. With the normal irrigation volume as the control (3071 $m^3 \cdot hm^{-2}$, I100), three deficit gradients were established, including light deficit (2686 $m^3 \cdot hm^{-2}$, I85), moderate deficit (2421 $m^3 \cdot hm^{-2}$, I75), and severe deficit (1955 $m^3 \cdot hm^{-2}$, I60). The plant height, the number of main stem nodes, the number of fruit branches, boll setting, and shedding characteristics of cotton were measured at different growth stages, the yield components of cotton were measured, and the irrigation water use efficiency was calculated during the harvest period. The results showed that: (1) the bud, flowering, full boll, and boll opening stages of cotton under deficit irrigation treatment were 1−2 days, 2−4 days, 3−8 days, and 4−11 days earlier than that under normal irrigation treatment; (2) Before entering the boll stage, the plant height and internode length of the main stem of cotton showed a trend of first increasing and then decreasing with decreased irrigation amount, and after the boll stage, both decreased with decreased irrigation amount; The number of bolls and fruit set in the middle and lower canopy of cotton decreased with decreased irrigation, and the number of fruit set in the middle canopy significantly differed among different irrigation treatments ($P < 0.05$); (3) At the harvest stage, the seed cotton yield of I100 treatment was 6090 $kg \cdot hm^{-2}$, which was 7.4%−27.3% higher than that of deficit irrigation treatment; The efficiency of irrigation water use increases with decreasing irrigation amount, and the highest is 2.27 $kg \cdot m^{-3}$. To sum up, when considering the benefits of agricultural production, efficient utilization of water resources, and the ecological environment, it is recommended to perform moderate deficit irrigation for cotton in Xinjiang to improve the efficiency of irrigation water utilization, save water resources, and achieve the optimization of social, economic, and ecological environment benefits while ensuring high crop yield.

Keywords: cotton; deficit irrigation; boll setting characteristics; irrigation water utilization efficiency